

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Izidor Demeter

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

prof.dr.sc. Franjo Cajner

Izidor Demeter

Zagreb, 2011.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IZIDOR DEMETER**

Mat. br.:0035167555

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **KERAMIČKI ALATNI MATERIJALI**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **CERAMIC TOOL MATERIALS**

Opis zadatka:

Osim alatnih čelika koji se upotrebljavaju za izradu raznih alata, zbog svojih dobrih svojstava danas se često upotrebljavaju i drugi materijali. Među njima značajni udjel zauzimaju keramički materijali koji nalaze primjenu u izradi raznih alata za rezanje i oblikovanje.

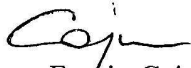
U radu treba navesti svojstva koja se traže od materijala alata. Sistematizirati i opisati keramičke materijale koji se upotrebljavaju za alate, navesti njihova svojstva i primjenu te prednosti koje se postižu njihovom uporabom u odnosu na ostale alatne materijale.

Zadatak zadan:
18. studenog 2010.

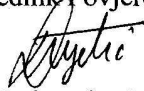
Rok predaje rada:
1. rok: **04. veljače 2011.**
2. rok: **05. srpnja 2011.**

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: **09. – 11. veljače 2011.**
2. rok: **11. – 13. srpnja 2011.**

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Referada za diplomske i završne ispite

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

Obrazac DS – 3A/PDS – 3A

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Zahvaljujem voditelju rada, prof. dr. sc. Franji Cajneru, te svim ostalim profesorima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji nam pomažu pri usvajanju vještina i gradiva iz različitih područja struke.

Izidor Demeter

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	IV
1. UVOD.....	1
2. ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM	2
2.1. TOKARSKI NOŽEVI	2
2.2. GLODALA.....	3
2.3. SVRDLA	5
3. INTERAKCIJA IZMEĐU ALATA I OBRATKA	6
4. MATERIJALI ZA IZRADU ALATA ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA.....	12
4.1. BRZOREZNI ČELICI	15
4.2. CERMET	16
4.3. TVRDI METAL	18
5. TEHNIČKA KERAMIKA ZA ALATE ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA.....	21
5.1. POVIJEST RAZVOJA TEHNIČKE KERAMIKE.....	23
5.2. MJEŠANA KERAMIKA $Al_2O_3 + TiC/TiN$	24
5.3. WHISKERIMA OJAČANA OKSIDNA KERAMIKA	28
5.4. $Al_2O_3 + ZrO_2$ (ZTA) KERAMIKA	30
5.5. NEOKSIDNA REZNA KERAMIKA (Si_3N_4)	31
6. VISOKOTVRDI ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA.....	35
6.1. POLIKRISTALNI DIJAMANT (PCD).....	35
6.2. KUBIČNI BOR NITRID (CBN).....	36
6.3. SVOJSTVA I PRIMJENA CBN-a I PCD-a.....	37
7. ZAKLJUČAK.....	39
8. LITERATURA.....	40

SAŽETAK

Rad se najvećim dijelom bavi tematikom keramičkih materijala koji se primjenjuju u obradi odvajanjem čestica. Sve procese obrade odvajanjem neizbježno prati i proces trošenja rezne oštrice alata. Kao i svi ostali procesi, i proces obrade definiran je ulazima, odnosno međusobnim odnosom ulaznih veličina, a kao jedna od posljedica opterećenja kojem je alat izložen prilikom procesa obrade jest i trošenje alata. U ovom će radu biti opisane prednosti upotrebe keramičkih i kompozitnih reznih pločica kao i njihov pozitivan utjecaj na trošenje, odnosno vijek trajanja alata. Zbog svojih specifičnih svojstava, ti materijali za razliku od klasičnih brzoreznih čelika koji su se u prošlosti najčešće upotrebljavali za izradu reznog dijela alata za obradu odvajanjem čestica, omogućuju efikasniju primjenu modernih visokobrzinskih obrada. Te metode su danas sve zastupljenije, kao odgovor na izazove koje pred njih stavlja suvremeno tržište, a u ovom slučaju to su visoka dimenzijska točnost i vrlo uska tolerancijska ograničenja za izratke.

POPIS SLIKA

Slika 1. Brzine i sile pri postupku tokarenja [1]	2
Slika 2. Jednodjelni tokarski nož i nož sa izmjenjivim reznim pločicama [1]	3
Slika 3. Jednodjelno glodalo [1].....	4
Slika 4. Glodalo s izmjenjivim reznim oštricama [1]	4
Slika 5. Jednodjelno svrdlo i svrdlo s izmjenjivim reznim oštricama [2]	5
Slika 6. Geometrija reznog klina [3].....	6
Slika 7. Udjeli pojedinih faza trošenja u ovisnosti o temperaturi [3]	7
Slika 8. Raspored trošenja na površini reznog klina [3]	8
Slika 9. Krater na reznjoj pločici [3]	9
Slika 10. Trošenje na stražnjoj površini alata [3].....	10
Slika 11. Tipska krivulja trošenja [3]	10
Slika 12. Više tipskih krivulja trošenja uz različite brzine rezanja [3]	11
Slika 13. Usporedba svojstava različitih materijala reznih alata [3]	13
Slika 14. Mikrostruktura čelika proizvedenog metalurgijom praha [9].....	16
Slika 15. Mikrostruktura cermeta (TiC/TiN + Ni) za grubu obradu [4].....	17
Slika 16. Rezna pločica od cermeta [11]	18
Slika 17. Mikrostruktura tvrdog metala (WC + TiC + TaC + Co) [9].....	20
Slika 18. Različiti oblici keramičkih reznih pločica [10]	22
Slika 19. Mikrostruktura miješane keramike $Al_2O_3 + 30\% TiC$ [4]	24
Slika 20. Prikaz SiC whiskera pod povećanjem od 1250× [4]	28
Slika 21. Rezne pločice od keramike ojačane whiskerima [13]	29
Slika 22. Mikrostruktura $Si_3N_4 + Al_2O_3, Y_2O_3$ vruće prešanog pri: a) 90min, b) 400min [4].....	33
Slika 23. Tokarski nož s reznom pločicom od silicijevog nitrida [11].....	34
Slika 24. Prikaz mikrostrukture PCD-a (povećanje od 500×) [15].....	35
Slika 25. Mikrostruktura CBN-a [15].....	37
Slika 26. CBN rezne pločice [16]	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost Taylorovog eksponenta m o vrsti materijala [4]	9
Tablica 2. Fizikalna svojstva reznih materijala [6, 7]	14
Tablica 3. Sastav i mehanička svojstva različitih vrsta tvrdih metala [5]	20
Tablica 4. Neka fizikalna svojstva oksidne i mješane keramike ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$) u usporedbi sa tvrdim metalom (P20) te cermetom na bazi $\text{TiC} + \text{ZrC}$ [4]	25
Tablica 5. Komparacija tvrdoće u ovisnosti o temperaturi tvrdog metala, čiste oksidne keramike i mješane keramike ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$) [4]	26
Tablica 6. Utjecaj posmaka i radijusa zakrivljenosti oštrice alata na hrapavost obrađene površine [4] ..	27
Tablica 7. Mikrostruktura i mehanička svojstva Si_3N_4 s dodatkom Al_2O_3 i Y_2O_3 vruće prešan 90 i 400 min uz konstantnu temperaturu i tlak [4]	32
Tablica 8. Svojstava različitih vrsta oksidnih (Al_2O_3) i neoksidnih (Si_3N_4) reznih keramika [4]	34
Tablica 9. Usporedba Knoopove tvrdoće različitih reznih materijala [4]	38

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

a_p	mm	dubina rezanja
f	mm/okr, mm/min	posmak
v_c	m/min, m/s	brzina rezanja
T		trajnost oštrice
m		Taylorov eksponent
C_t		Taylorova konstanta
VB	mm	istrošenost stražnje površine
R_e	N/mm ²	granica razvlačenja
ϑ	°C	temperatura
HRC	HRC	tvrdoća po Rockwellu
HV	HV	tvrdoća po Vickersu
E	N/mm ²	modul elastičnosti
$R_{m\ s}$	N/mm ²	savojna čvrstoća
$R_{m\ tl}$	N/mm ²	tlačna čvrstoća
K_{IC}	N/mm ^{3/2}	lomna žilavost
α	K ⁻¹	linearni koeficijent toplinskog istezanja
λ	W/mK	toplinska vodljivost
Ra	μm	aritmetičko odstupanje profila
	N/mm ²	tvrdoća po Knoopu
ρ	kg/m ³	gustoća
r_ϵ	mm	radijus reznog vrha oštrice

1. UVOD

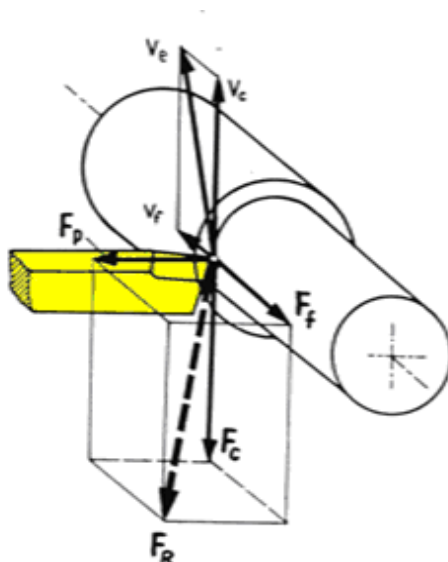
Prijelomni koraci u racionalizaciji proizvodnje kroz povijest bili su uvjetovani trenutnim društvenim odnosima i dostignutim stupnjem tehnološkog razvoja. S obzirom na današnju krizu i recesiju koja je zahvatila cijeli svijet, te velike konkurencije na svim područjima djelatnosti, a pogotovo u proizvodnji, poduzeća su primorana koristiti se različitim sredstvima i metodama kako bi osigurala opstanak vlastite proizvodnje. S ciljem očuvanja konkurentnosti, poduzeće ne smije dovesti u pitanje kvalitetu proizvoda, što znači da smanjenje troškova proizvodnje predstavlja veliki izazov. Korištenje suvremenih alata za obradu odvajanjem čestica, koji zbog svojih specifičnih svojstava omogućuju smanjenje strojnog vremena po proizvodu, mogu biti jedan od načina kako te troškove smanjiti. Kada govorimo o alatima za obradu odvajanjem čestica, opće je poznato da na tom području postoji niz različitih postupaka izrade, a u novije vrijeme svaki od tih postupaka kao završnu fazu podrazumijeva neki postupak toplinske obrade te modificiranja ili prevlačenja površine. Kao trend se pokazala i sve veća zastupljenost visokobrzinskih obrada koje zahtijevaju izdržljivije odnosno trajnije materijale, a kao najbolji odgovor na to pokazali su se keramički materijali te materijali od tvrdog metala, uglavnom prevučeni, koji u principu nisu ništa drugo nego neoksidni keramički materijal, te cermet (ceramics + metal) – keramika ugrađena u metalnu matricu. Rezni alati od navedenih materijala su viših cijena od uobičajenih, što je posve razumljivo, no njihovi proizvođači rade proračune koji osiguravaju kompromis između njihove zarade i uštede koju korisnici tih alata postižu u proizvodnji. U nastavku rada biti će opisane vrste alata za obradu odvajanjem čestica, te oblici njihovog trošenja i na kraju prednosti ili nedostaci koje rezni alati od keramičkih i kompozitnih materijala posjeduju u odnosu na klasične.

2. ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM

S obzirom na temu završnog rada, u startu će biti navedeni i objašnjeni najčešći alati za obradu odvajanjem kod kojih se primjenjuju rezne pločice od keramičkih i kompozitnih alata – tokarski noževi, glodala, svrdla, turpije, razvrtala, upuštal a i pile, od kojih su najčešće korišteni tokarski noževi, glodala i svrdla, čiji kratak opis, podjela i pregled materijala od kojih se izrađuju slijedi u nastavku.

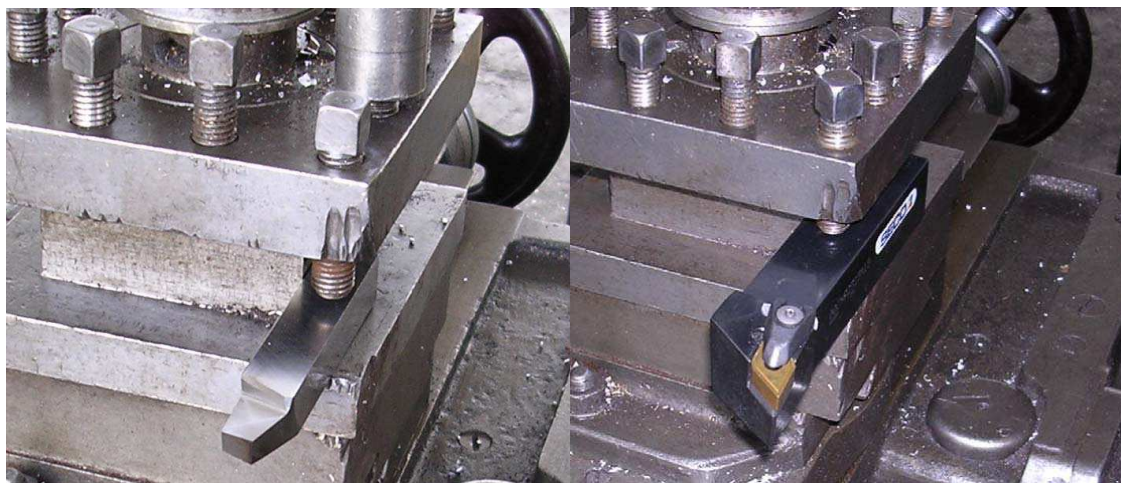
2.1. TOKARSKI NOŽEVI

Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom. Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica za izradu pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih te okruglih i neokruglih) predmeta. Izvodi se na alatnim strojevima, tokarilicama i tokarskim obradnim centrima, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i izvodi ga obradak. Posmično gibanje je kontinuirano pravocrtno gibanje u ravnini okomitoj na pravac brzine glavnog gibanja i izvodi ga alat [1]. Os glavnog gibanja ne mijenja svoj položaj prema obradku bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja. Glavna brzina rezanja se označava sa v_c , posmična sa v_f , dok je v_e rezultatna brzina rezanja. Glavna sila rezanja se označava sa F_c , posmična sa F_f te natražna sa F_p dok je F_r prostorna rezultanta.



Slika 1. Brzine i sile pri postupku tokarenja [1]

Postoje dvije izvedbe tokarskog noža, prva je nož izrađen od jednog dijela (uglavnom od brzoreznog čelika, te nož s izmjenjivim reznim pločicama (nosač pločica – uglavnom od nekog alatnog čelika, te izmjenjive pločice – tvrdi metal, cermet, keremika...).



Slika 2. Jednodjelni tokarski nož i nož sa izmjenjivim reznim pločicama [1]

2.2. GLODALA

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala i mogu biti smještene ili na obodnoj ili na obodnoj i čeonj plohi glodala. Zubi glodala periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja glodala. Istodobno je u zahvatu s obratkom samo nekoliko zuba glodala. Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica koje se koristi za dobivanje širokog spektra površina proizvoljnih oblika. Izvodi se na alatnim strojevima, glodalicama i glodačim obradnim centrima, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i izvodi ga alat. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera i najčešće ga izvodi obradak. Os okretanja glavnog gibanja ne mijenja svoj položaj prema alatu bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja [1]. Glodalo također može biti izvedeno, kao i tokarski nož, na 2 načina – jednodjelno, ili glodalo sa izmjenjivim reznim pločicama (slika 3. i 4.).



Slika 3. Jednodjelno glodalo [1]



Slika 4. Glodalo s izmjenjivim reznim oštricama [1]

2.3. SVRDLA

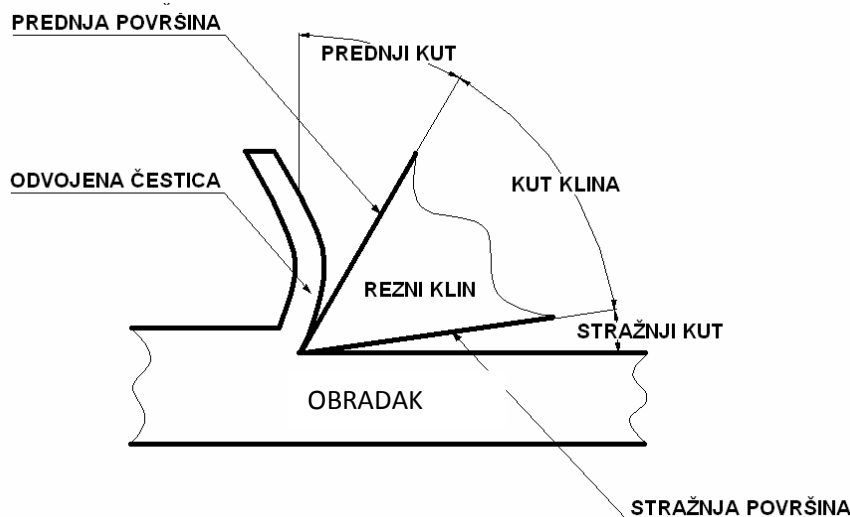
Alat za bušenje rupa i provrta je svrdlo definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu ali mora postojati. Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera ili proširivanje istih na veće promjere. Izvodi se na alatnim strojevima, najčešće na bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje kontinuirano pravocrtno i potrebno ga je izvoditi istodobno kad i glavno gibanje da bi se zadržao kontinuitet obrade. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Neke od karakteristika obrade bušenjem su mala krutost sustava, otežano odvođenje odvojene čestice i dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP), promjenjiva brzina te promjenjivi kutevi rezanja duž glavne rezne oštrice [1]. Kao i tokarski nož i glodalo, svrdla također mogu biti jednodjelna ili sa izmjenjivim reznim oštricama (slika 5.).



Slika 5. Jednodjelno svrdlo i svrdlo s izmjenjivim reznim oštricama [2]

3. INTERAKCIJA IZMEĐU ALATA I OBRATKA

Prema teoriji rezanja, osnovni element svih reznih alata, bez obzira na vrstu obrade odvajanjem čestica jest rezni klin. Radi pojednostavljenja se promatranje vrši na reznom klinu koji se nalazi u zahvatu obratka. Sam rezni klin definiran je svojim kutem, tj. kutem klina alata, kutem prednje površine te kutem stražnje površine.



Slika 6. Geometrija reznog klina [3]

Na mjestu interakcije alata i obratka za vrijeme obrade, pojavljuju se određeni procesi koji se mogu definirati kao mehanizmi trošenja alata, a kao njihov rezultat djelovanja pojavljuje se oštećenje oštrice i površine alata koja u konačnici čine alat neupotrebljivim u daljnjem procesu obrade. Istraživanje mehanizama trošenja i pronalaženje rješenja koja bi taj proces usporila ili možda čak u idealiziranom slučaju eliminirala, predstavlja i dalje veliki izazov istraživačima inih pojava. Cilj je stvaranje alata koji će imati veću postojanost, te lakše podnositi sve zahtjevnije parametre obrade. Spomenuti mehanizmi trošenja ovisni su o svojstvima obrađivanog materijala, no također i svojstvima reznog alata kao i parametrima i ostalim utjecajnim faktorima obrade.

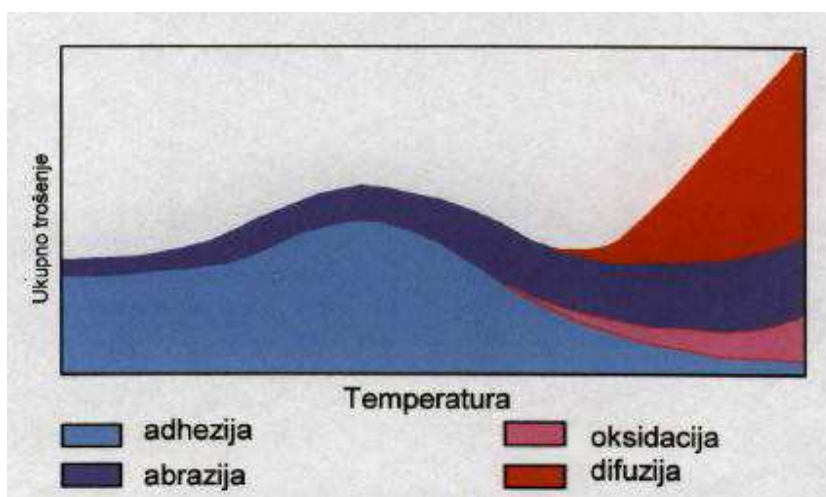
Općenito, procesi trošenja mogu se podijeliti u 2 skupine [3]:

- Proces koji su posljedica mehaničkog djelovanja
- Proces koji su posljedica fizikalno–kemijskog djelovanja između alata, obratka te okoline.

Glavni mehanizmi trošenja koji se pojavljuju kao rezultat navedenih procesa pri obradi rezanjem na mjestu interakcije između alata i obratka su [3]:

- Abrazijsko trošenje
- Difuzijsko trošenje
- Oksidacijsko trošenje
- Adhezijsko trošenje

Kao što je rečeno, veličina i udio pojedinih mehanizama u konkretnom slučaju ovisi svojstvima obratka, svojstvima alata te o parametrima i uvjetima obrade, ali općenito gledajući, udio pojedinih mehanizama trošenja najviše ovisi o temperaturi koja se razvija na mjestu interakcije alata i obratka za vrijeme rezanja kao što je prikazano na slici 7.

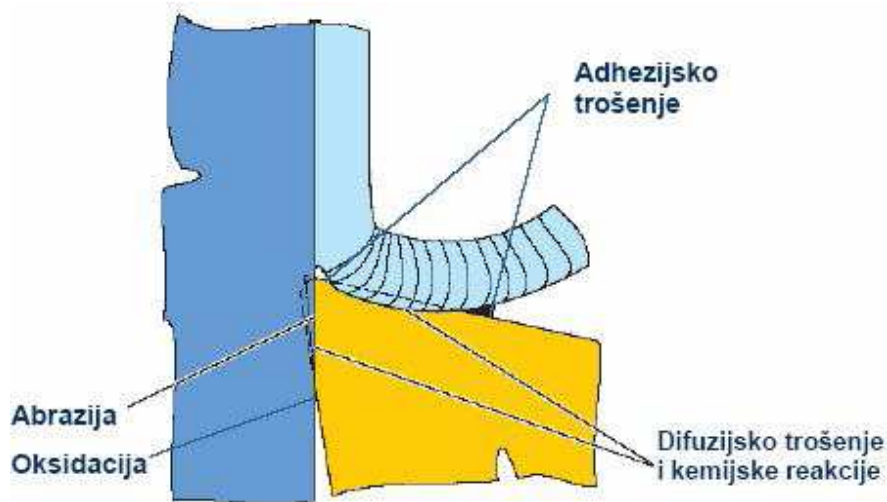


Slika 7. Udjeli pojedinih faza trošenja u ovisnosti o temperaturi [3]

Na slici 7 vidi se da su abrazijsko i adhezijsko trošenje zastupljeni pri svim temperaturama što znači da je neophodna njihova redukcija i za rezanje manjim brzinama, dok nema razvijanja visokih temperatura, da bi uspjeli omogućiti da alat provede dovoljno dugo vremena prije nego dođe do dozvoljene istrošenosti oštrice. Visoke temperature sa sobom donose i druga 2 tipa trošenja rezne oštrice – difuziju i oksidaciju. S obzirom da je glavni cilj osigurati duži vijek trajanja alata, potrebno je izabrati alat koji će pokazati što veću otpornost na prisutne mehanizme trošenja. To će ovisiti o parametrima obrade i tipove trošenja koji će se za te uvijete javljati. Više je razloga koji utječu na uporabni vijek alata uključujući gubitak prvobitne geometrije zbog pojave nekih od gore navedenih oblika trošenja, plastičnog tečenja ili loma. Vijek trajanja također može uvjetovati i loša završna obrada, prekomjerna sila pri obradi, nedopustivo visoko

dinamičko opterećenje ili previsoka temperatura koje utječu na promjene površinskih svojstava alata te moguće strukturne nehomogenosti materijala alata.

Na slici 8 je prikazano na kojim dijelovima površine reznog klina dolazi do pojedinih mehanizama trošenja.



Slika 8. Raspored trošenja na površini reznog klina [3]

Pri odvijanju procesa rezanja na površini i oštrici alata pojavljivanjem navedenih mehanizama trošenja dolazi do pojavljivanja različitih oblika istrošenosti. Na pojedine oblike istrošenosti imaju utjecaj jedan ili više mehanizama trošenja ovisno o vrsti obratka, vrsti alata te parametrima i uvjetima obrade. Najčešći oblici dotrajivosti alata su krater na prednjoj površini alata te istrošenost stražnje površine alata. Krater predstavlja potpuno uništenje prednje površine alata, a pojavljuje se zbog prevelike temperature te prevelikog pritiska na prednjoj površini alata. Vrlo je problematičan oblik trošenja s obzirom da je gotovo nemoguće egzaktno odrediti parametre pri kojima nastaje, te uopće senzorski uređajima pratiti njegovo nastajanje. Pored smanjenja posmaka i brzine rezanja, pojavljivanje kratera može se izbjeći i korištenjem materijala velike temperaturne postojanosti i pritiskne čvrstoće koji može biti i u obliku prevlake.

Na slici 9 je prikazan krater na prednjoj površini rezne pločice.



Slika 9. Krater na reznjoj pločici [3]

S obzirom da je temperatura tijekom rezanja najvažnija varijabla pri procjeni vijeka trajanja alata, postoje određeni modeli kojima se može izračunati približni vijek trajanja alata, a jedan od njih je i opći oblik Taylorovog modela koji prikazuje trošenje ovisno o glavnoj brzini rezanja [3]:

$$v_c \times T^m = C_t$$

u kojem se v_c odnosi na glavnu brzinu rezanja, T na trajnost oštrice, dok C_t predstavlja Taylorovu konstantu, a m Taylorov eksponent. Vrijednosti Taylorovog eksponenta variraju s obzirom na vrstu materijala koji se primjenjuje pri obradi, neke od vrijednosti prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Ovisnost Taylorovog eksponenta m o vrsti materijala [4]

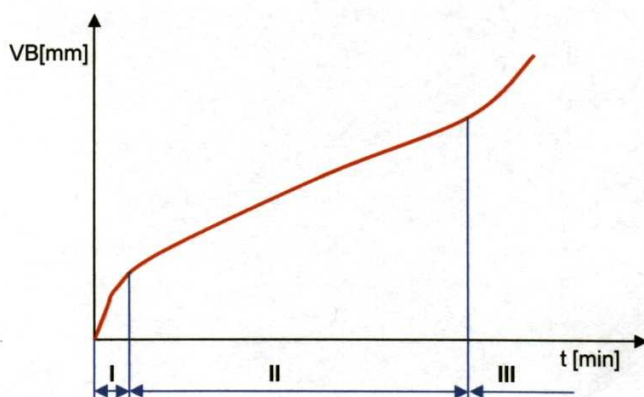
Vrsta materijala:	m
Brzorezni čelik	0,1
Tvrđi metal	0,2
Keramika	0,4

Može se utvrditi kako vrijednost Taylorovog eksponenta m raste s obzirom na otpornost koju materijal pokazuje prema padu tvrdoće na povišenim temperaturama. Važno je napomenuti kako se za Taylorov proračun pretpostavlja konstantan presjek odvojene čestice ($a_p \times f$) te konstanta brzina rezanja. Kao parametar trošenja uzima se trošenje na stražnjoj površini alata VB, koje je prikazano na slici 10.



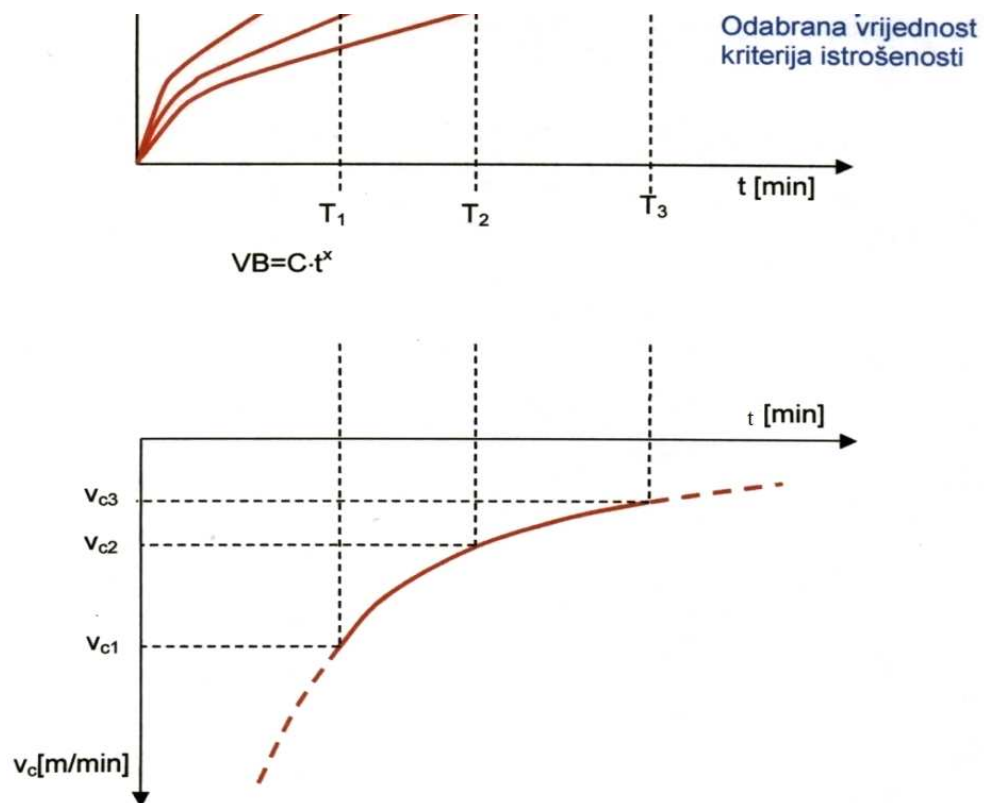
Slika 10. Trošenje na stražnjoj površini alata [3]

Iz Taylorovog proračuna trošenja, na kraju se dobije tipska krivulja trošenja koja se razlikuje kako za svaku kombinaciju materijal obratka – materijal reznog alata, tako i za svaku brzinu rezanja, uz isti posmak i dubinu rezanja. Na kraju se može zaključiti kako s obzirom na Taylorov eksponent keramike, koji je dvostruko veći od tvrdih metala (WC), te čak četverostruko veći od brzoreznog čelika, možemo očekivati daleko bolje rezultate za primjenu keramike kao reznog alata pri visokim brzinama rezanja.



Slika 11. Tipska krivulja trošenja [3]

Na slici 11 prikazan je primjer tipske krivulje trošenja, primjećuju se 3 različite faze prema vremenu obrade: I. se odnosi na period uhodavanja, II. na period „normalnog trošenja“, a posljednja III. faza označava period naglog trošenja te u konačnici tzv. „smrt“ alata. Oblik krivulje je približno isti za sve vrste materijala reznih alata, razlike su naravno u iznosima trošenja i ukupnog vremena nakon kojeg dolazi do perioda naglog trošenja.



Slika 12. Više tipskih krivulja trošenja uz različite brzine rezanja [3]

Prema slici 12. može se i vizualizirati način određivanja vijeka trajanja oštrice alata Taylorovom metodom. Prikazane su 3 krivulje za istu kombinaciju obradka – alat, uz jednak posmak f i dubinu rezanja a_p , ali uz različite brzine. Očito je da se sa povećanjem brzine smanjuje vijek trajanja reznog dijela alata.

4. MATERIJALI ZA IZRADU ALATA ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA

Za početak poglavlja o materijalima koji se koriste za izradu alata za obradu odvajanjem, potrebno je navesti koji su uopće uvjeti koji ti materijali moraju ispunjavati, odnosno koji se zahtjevi stavljaju prema alatima za obradu odvajanjem. Opća zahtjevana svojstva svih alata pa tako i reznih su prvenstveno [5]:

- otpornost na trošenje
- udarna izdržljivost (žilavost, visoka udarna radnja loma)

Ta dva navedena zahtjeva treba smatrati neophodnim uvjetima potrebnima za rad svakog alata. Za vrijeme obrade prvenstveno dolazi do trošenja alata abrazijom to jest djelovanje tvrdih čestica obratka na odnošenje dijelova radne površine ili same rezne oštrice alata. Iako nije uvijek dominantna, nije ni zanemariva i komponenta trošenja adhezijom to jest navarivanjem čestica obrađivanog metala na rezu oštricu ili samu prednju površinu alata (na primjer stvaranje „lažne oštrice“ pri rezanju čelika visokog udjela ferita). Kod alatnih čelika treba posebno razjasniti što je to žilavost. U ovome slučaju na vrijedi opća koncepcija prema kojoj žilavost predstavlja površina ispod krivulje „naprezanje-deformacija“. Za alatne čelike bitno je da je ta, po mogućnosti velika, površina obilježena visokim R_c , jer se želi da se alat ne deformira trajno pod djelovanjem nastalih naprezanja, a niti neposredno prije loma zbog preopterećenja. Što potpunije ispunjenje navedenih općih zahtjeva definira takozvano kompleksno svojstvo radnog kapaciteta alata. Nemogućnost potpunog ispunjenja oba spomenuta zahtjeva istovremeno za sada isključuje mogućnost stvaranja jednog jedinog univerzalnog alatnog čelika [5].

Pored spomenutih neophodnih svojstava, na alate za obradu odvajanjem čestica postavljaju se još neki dodatni zahtjevi kao [3,5]:

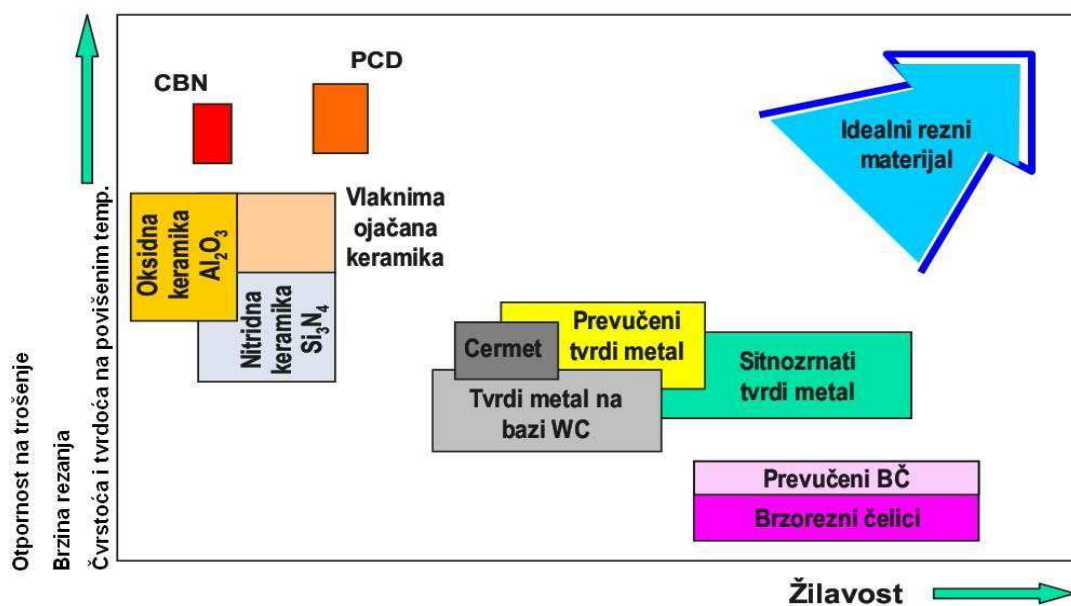
- otpornost na popuštanje
- rezna čvrstoća brida
- unutrašnja stabilnost mikrostrukture
- oksidacijska postojanost
- otpornost prema difuziji

Odabir odgovarajućeg materijala za alat za obradu odvajanjem za određenu operaciju prvi je korak u razradi optimalnog plana proizvodnje za neki pripremak. Materijal alata ponajviše ovisi o materijalu priprema koji će se obrađivati te samim operacijama koje će se izvoditi. Često

nam se pruža mogućnost izbora više od jednog materijala alata koji će učinkovito omogućiti izradu, no ne i ujedno ekonomski isplativog. Dodatni faktori pri izboru odgovarajućeg alata su [3]:

- snaga i krutost stroja te broj okretaja
- zahtjevana produktivnost
- financijska ograničenja
- stupanj opterećenja alata
- troškovi rada i eventualnih zastoja

S obzirom da je sam sustav „alat-obradak“ najvažniji utjecajni čimbenik pri izboru odgovarajućeg materijala za rezni alat u nastavku će biti navedeni najčešći materijali koji se upotrebljavaju za izradu alata za obradu odvajanjem te njihove prednosti, svojstva i ograničenja svake skupine materijala. Naime, materijali obratka mogu biti različiti, metalni, nemetalni, željezni, neželjezni itd. Najčešće se ipak obrađuju željezni materijali no i među njima postoje značajne razlike koje utječu na izbor alata. Jedan od promatranih parametara je vlačna čvrstoća. Njenim se povećanjem automatski povećava i tvrdoća te sama obradivost postaje zahtjevnija. Na slici 13 prikazan je kvalitativan pregled najčešće upotrebljavanih materijala za izradu alata za obradu odvajanjem čestica s obzirom na odnos otpornosti na trošenje, čvrstoće te otpornosti na popuštanje, prema žilavosti. Primjećuje se kako trenutno ne postoji materijal koji bi objedinio ta potrebna svojstva.



Slika 13. Usporedba svojstava različitih materijala reznih alata [3]

Na tablici 2 prikazani su najčešće korišteni materijali na području obrade odvajanjem čestica te fizikalna svojstva (pri sobnoj temperaturi) koja ih karakteriziraju. S obzirom na navedene podatke, uspoređujući ih s prethodnom slikom 13, objašnjen je njezin smisao te ideja o idealnom reznom materijalu koji bi objedinjavao svojstva lomne žilavosti i savojne čvrstoće brzoreznog čelika te visoku tvrdoću te otpornost na popuštanje koja karakterizira keramičke materijale.

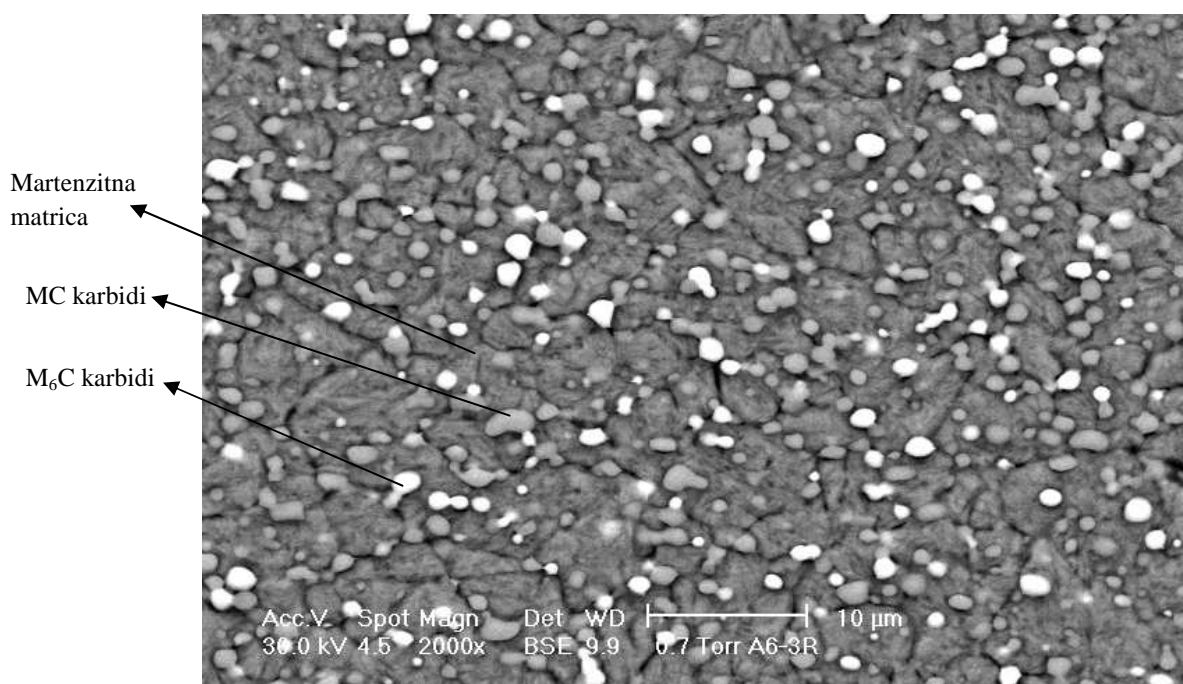
Tablica 2. Fizikalna svojstva reznih materijala [6, 7]

	Brzorezni čelik	Tvrđi metal	Oksidna rezna keramika	Si ₃ N ₄ rezna keramika	CBN	PCD
Gustoća (g/cm ³)	8,0-9,0	6,0-15,0	3,9-4,5	3,2-3,6	3,45	3,5
Tvrdoća (HV 10/30)	700-900	1200-1800	1450-2100	1350-1600	3500	7000
Savojna čvrstoća (kN/mm ²)	2500-4000	1300-3200	400-800	600-950	500-800	600-1100
Lomna žilavost (mN/mm ²)	15-30	10-17	4-6	5-7	-	-
Tlačna čvrstoća (kN/mm ²)	2800-3800	3500-6000	3500-5500	-	-	3000
Modul elastičnosti (kN/mm ²)	260-300	470-650	300-450	300-380	680	840
Koef. toplinskog istezanja (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	9-12	4,6-7,5	5,5-8,0	3,0-3,8	1,2	0,8
Toplinska vodljivosti (W/mK)	15-48	20-80	10-38	30-60	445	780-1200

4.1. BRZOREZNI ČELICI

Najstarija verzija alata za obradu odvajanjem bili su alati od visokougličnih alatnih čelika. Bili su to uglavnom nelegirani čelici koji toplinskom obradom nisu postizali dovoljno visoku tvrdoću. Budući da su alati za obradu odvajanjem čestica tijekom eksploatacije izloženi visokim temperaturama te visokom trošenju, jedini čelici koji posjeduju potrebna svojstva za ovu primjenu su brzorezni čelici. Brzorezni čelici su čelici legirani sa jakim karbidotvorcima kao što su Cr, Co, W, V, Mo te sa povišenim udjelom ugljika od 0,7...1,3%. Ovakav sastav rezultira stvaranjem slobodnih karbida kao nosioca otpornosti na trošenje, postojanih i pri visokim temperaturama. Dobivena mikrostruktura posjeduje veliku otpornost na trošenje i otpornost na popuštanje pri radnim temperaturama do 500...600°C. Za što bolja svojstva pri eksploataciji najpogodnija je struktura sa sitnim, zaobljenim, ravnomjerno raspodijeljenim karbidima. Današnji brzorezni čelici proizvode se uobičajenim lijevanjem u ingote, ali i novijim postupkom metalurgije praha. To je tehnološki postupak pomoću kojeg se proizvode čvrsta metalna tijela sjedinjavanjem čestica praška jednog ili više metala. Sama proizvodnja sastoji se od proizvodnje praha, prešanja i sinteriranja (sraščivanja). Takvim načinom omogućeno nam je postizanje sitnozrnate mikrostrukture sa fino dispergiranim karbidima što pak utječe na poboljšanje svojstava u odnosu na brzorezne čelike proizvedene klasičnim postupcima kao npr. povišenje žilavosti nakon toplinske obrade na tvrdoću od 68-70 HRC u odnosu na klasično proizvedene čelike. Alati proizvedeni tim načinom imaju duži vijek trajanja s obzirom na povećanu otpornost na trošenje bez opasnosti od krhkog loma zbog manje žilavosti. Sve ti pozitivni faktori popraćeni su naravno višom cijenom s obzirom da je i sama metalurgija praha mnogo skuplji postupak od klasičnog lijevanja u ingote. Na slici 14 prikazana je mikrostruktura jednog čelika proizvedenog metalurgijom praha gdje se uočava disperzija karbida unutar martenzitne matrice. Da bi ovi čelici u eksploataciji zadovoljili zahtijevane uvjete, neophodno je pravilno provođenje toplinske obrade kojoj se mora posvetiti velika pažnja. Zbog male toplinske vodljivosti ovih čelika potrebno je trostupnjevano predgrijavanje pri austenitizaciji. Pri temperaturama preko 700...800°C treba spriječiti pojavu razugliččenja primjenom određene zaštite. Na temperaturi austenitizacije treba držati kratko, pazeći da ne dođe do pregrijavanja. Nakon toga se vrši popuštanje dva ili tri puta u trajanju od jednog sata, pri temperaturi 550...600°C zbog pojačanja učinka sekundarnog otvrdnuća. Tako pri popuštanju na temperaturi od oko 550°C tvrdoća naraste na gotovo maksimalnih 66 HRC.

Tvrde prevlake su jedan od načina kako poboljšati performanse brzoreznih čelika posebno pri obradi željeznih legura. Fizikalno prevlačenje iz parne faze (PVD) omogućuje nanošenje prevlake od (najčešće) titan-nitrida (TiN). Prevlaka se dobiva na način da se para koja sadrži čestice TiN učvršćuje na površini alata u vakuumskim komorama. Moguće je također i nanošenje drugačijih prevlaka kao npr. titan-karbonitrid (TiCN), cirkonijev nitrid (ZrN) te kromov nitrid (CrN). PVD postupak provodi se na temperaturama nižim od temperatura popuštanja brzoreznog čelika (ispod 500°C) te nema promjene tvrdoće odnosno još jednog dodatnog popuštanja uslijed PVD postupka. Upotrebom prevlaka omogućeno je povišenje otpornosti na trošenje brzoreznog čelika, no s obzirom da je debljina prevlake reda veličina 4 - 7 μm i sama prevlaka se troši u strojnoj obradi te ne omogućuje kvalitetnu obradu abrazivnih materijala tvrdih od 40 HRC [5,8].

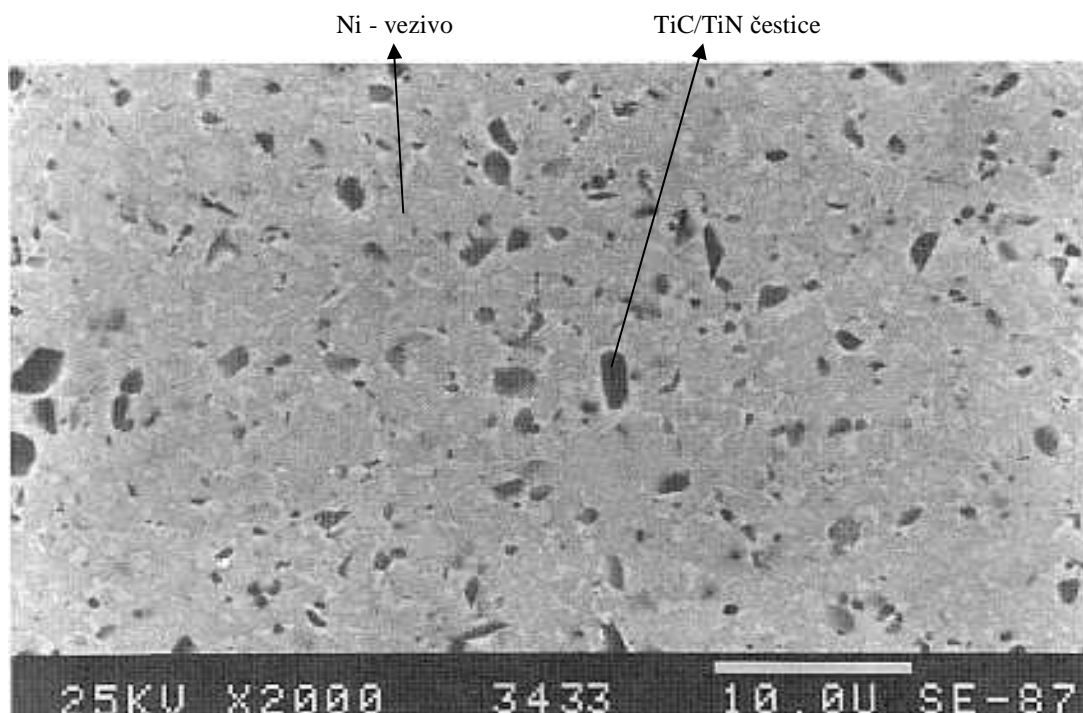


Slika 14. Mikrostruktura čelika proizvedenog metalurgijom praha [9]

4.2. CERMET

S obzirom da cermet ne pripada skupini keramičkih materijala, naveden je odmah nakon brzoreznih čelika. Cermet je zapravo keramičko-metalni kompozit koji se sastoji od TiC i Ni. Titan-karbid (ili titan-nitrid) daje mu visoku tvrdoću, a razlikuje se od „klasične“ tehničke keramike po tome što posjeduje metalnu fazu koja služi za povezivanje samog materijala (metalna faza je nikel-kobalt). U usporedbi sa klasičnim tvrdim metalima, cermet pokazuje

superiornu otpornost na visoke temperature, bolje karakteristike u pogledu trenja, višu otpornost na oksidaciju i koroziju, jednostavno otporniji je na trošenje nego klasični tvrdi metali. Koristi se za obradu odvajanjem čestica, posebno za dijelove kod kojih je potrebno postići uske tolerancije. Popularnost ili prihvaćanje cermeta za rezni alat u SAD-u nije na razini onoga što njegove performanse nude i omogućuju. U Japanu naime cermeti predstavljaju 30% ukupnih troškova alata, što je u usporedbi s 5% u SAD-u daleko značajnije. Prednosti cermeta odnose se na povišenu produktivnost preko povećanih brzina rezanja te dužeg vijeka trajanja alata. S obzirom da im je cijena oko 20% niža u odnosu na prevučene tvrde metale, a ujedno posjeduju i bolja svojstva, očigledno je da potencijal cermeta u obradi čeličnih materijala nije ni približno dostignut [4,10].



Slika 15. Mikrostruktura cermeta (TiC/TiN + Ni) za grubu obradu [4]



Slika 16. Rezna pločica od cermeta [11]

4.3. TVRDI METAL

Tvrđi metal svrstava se u kategoriju keramičkih materijala i to u skupinu neoksidne keramike, iako se radi također o keramičkom-metalnom kompozitu. Od ostalih neoksidnih keramičkih materijala razlikuju se po izraženim metalnim svojstvima, a to su prvenstveno električna i toplinska vodljivost. Mikrostruktura tvrdih metala sastoji se od visokog udjela karbida volframa, titana i tantala, koji su međusobno povezani najčešće kobaltom. U početku je ova vrsta materijala bila razvijena kao volframov karbid (WC) u vezivu kobalta (Co). Primjenjivao se za obradu sivog lijeva. Ova vrsta metala posjeduje iznimno dobru kombinaciju svojstava, koja proizlazi iz strukture, a pogodna je upravo za izradu različitih alata, posebno reznih, na kojima je naglasak ovoga rada. Sklonost navarivanju i erozijskom trošenju smanjuje se dodatkom TiC ili TaC. Titanov karbid povisuje čvrstoću na povišenim temperaturama, tvrdoću i otpornost na oksidaciju. Udio kobalta kreće se u tvrdim metalima od oko 5% do oko 17%. Što je veća količina veziva veća je savojna a manja tlačna čvrstoća. Općenito, karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje, dok vezni metal osigurava žilavost višefaznog materijala. Smanjenjem veličine karbida žilavost se povećava dok se tvrdoća neznatno mijenja. U praksi se koriste neprevučeni i prevučeni tvrdi metali. U odnosu na neprevučene, najvažnija razlika prevučenih tvrdih metala je u tome što je značajno smanjena njihova sklonost difuzijskom trošenju. Postavlja se pitanje koliko su prevučeni tvrdi metali iz upotrebe istisnuli neprevučene? S obzirom da su oblici trošenja u uskoj vezi s parametrima obrade, može se zaključiti kako prevučeni tvrdi metali najviše dolaze u prednost pri visokobrzinskoj obradi gdje se pojavljuju

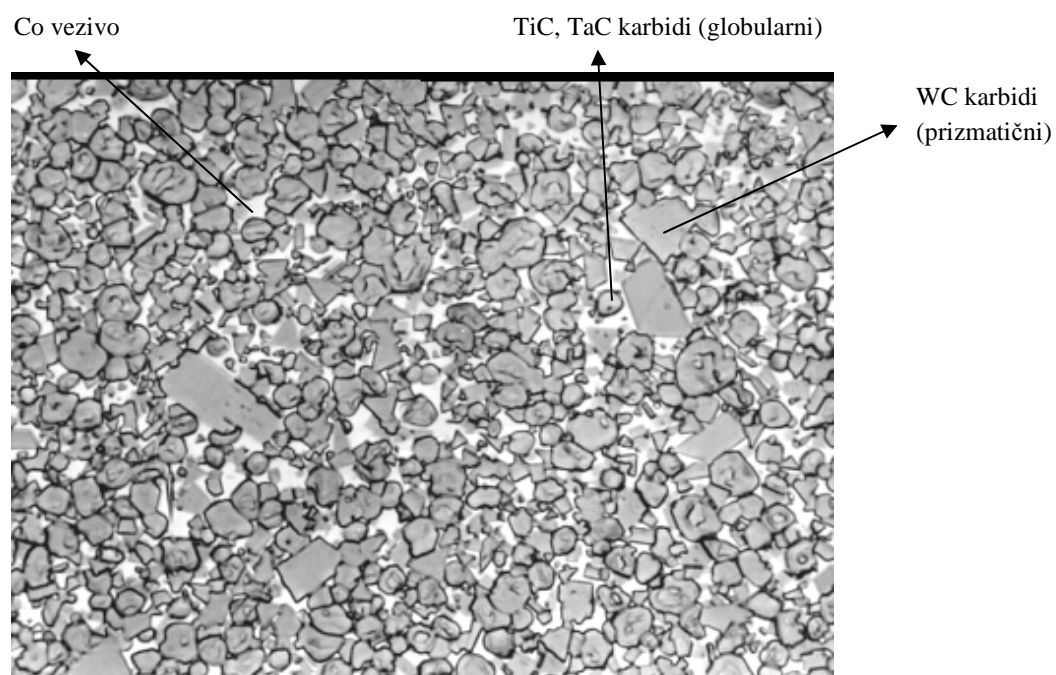
visoke temperature u reznjoj zoni koje i uzrokuju difuzijske procese. Te visoke temperature uzrokuju pojavu da kobaltno vezivo difundira iz matrice prilikom obrade. Kako vezivo difundira, zrnca karbida također mijenjaju svoj položaj, ostavljajući iza sebe promijenjenu geometriju reznog dijela alata, posebice zatupljenje glavne oštrice te krater na prednjoj površini. Nisu svi alatni strojevi u stanju postići brzine rezanja na kojima bi se mogli pojaviti difuzijski procesi, što zbog zastarjelosti, što zbog nedostatka snage, te se u takvim uvjetima i dalje koriste neprevučeni tvrdi metali [4,5,8]. Na slici 17 prikazana je mikrostruktura tvrdog metala.

Tvrđi metali imaju sljedeća dobra svojstva [8]:

- visoko talište
- visoku tvrdoću i otpornost na trošenje
- visok modul elastičnosti, visoku tlačnu čvrstoću i na visokim temperaturama
- dobru postojanost na temperaturne oscilacije
- dobru prionjivost s metalnim taljevinama
- otpornost na koroziju

Budući je najvažnije područje primjene tvrdih metala uporaba za rezne alate u obradi odvajanjem čestica napravljena je i podjela na osnovi toga u tri skupine [8]:

- TVRDI METALI GRUPE P imaju do 43% TiC i TaC. Prikladni su za obradu materijala s dugom strugotinom pri čemu su moguće, ovisno o vrsti tvrdog metala i vrsti obrade, različite brzine obrade.
- TVRDI METALI GRUPE K prikladni su za obradu materijala s kratkom strugotinom kao što su ljevovi na bazi željeza, porculan, kamen, drvo i tvrdi, punjeni polimerni materijali. Sastav im je oko 90% volframova karbida (WC), 0...4% titanova karbida (TiC) i/ili tantalova karbida (TaC), ostatak kobalt (Co). Kod obrade žilavih materijala kao što je čelik stvaraju se naljepci i izjednost, što je posljedica navarivanja strugotine na rezne oštrice reznog alata.
- TVRDI METALI GRUPE M za obradu svih materijala sadrže 80...85% WC i do 10% TiC i/ili TaC, ostatak Co. Mogu se upotrijebiti za obradu čelika do srednjih brzina rezanja.



Slika 17. Mikrostruktura tvrdog metala (WC + TiC + TaC + Co) [9]

Tablica 3. Sastav i mehanička svojstva različitih vrsta tvrdih metala [5]

skupina prema prikladnosti za bradu (prema ISO/R513 i DIN 4990)	raste u smjeru strelice	sastav, %			tvrdoća HV30	savojna čvrstoća R _{ms} , N/mm ²	tlačna čvrstoća R _{m_{tl}} , N/mm ²	modul elastičnosti E, N/mm ²
		WC	TiC+ TaC	Co				
P02	↑ E N J E S O R T A N D R V T S O N R O P T O	33	59	8	1650	800	5100	440·10 ³
P10		55	36	9	1600	1300	5200	530·10 ³
P20		76	14	10	1500	1500	5000	540·10 ³
P30		82	8	10	1450	1800	4800	560·10 ³
P40		74	12	14	1350	1900	4600	560·10 ³
M10	↑ A N J A Z E R A N D R V T S O N R O P T O	84	10	6	1700	1350	6000	580·10 ³
M20		82	10	8	1550	1650	5000	560·10 ³
M40		79	6	15	1350	2100	4400	540·10 ³
K03	↓ A N J A Z E R A N D R V T S O N R O P T O	92	4	4	1800	1200	6200	630·10 ³
K10		92	2	6	1650	1500	5800	630·10 ³
K20		92	2	6	1550	1700	5500	620·10 ³
K30		93	-	7	1400	2000	4600	600·10 ³
K40		88	-	12	1300	2200	4500	580·10 ³

5. TEHNIČKA KERAMIKA ZA ALATE ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA

Keramički materijali su anorganski i nemetalni, u pravilu oblikovani pri sobnoj temperaturi iz sirove mase te postižu svoja tipična svojstva nakon postupka pečenja, odnosno sinteriranja, pri visokim temperaturama.

U određenim dijelovima obrade odvajanjem čestica kao osnovni materijal alata često se koriste različite vrste tehničke keramike. To mogu biti [5]:

- 1) oksidne keramike – materijali koji se uglavnom sastoje od jednokomponentnih i jednofaznih metalnih oksida (>90%): *čisti aluminijev oksid* (Al_2O_3) poznat kao sinterirani korund, *aluminijev oksid ojačan cirkonijevim oksidom* (ZTA), *aluminijev oksid ojačan titan karbidom*, te *whiskerima ojačana oksidna keramika* ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ZrO}_2 + 20\% \text{SiC}$)
- 2) neoksidne keramike – materijali na temelju spojeva bora, ugljika, dušika i silicija (najbitniji u proizvodni tehničke keramike za obradu odvajanjem). Zahvaljujući velikom udjelu kovalentnih veza, omogućena je primjena pri visokim temp., osiguran je visok modul elastičnosti, velika čvrstoća i tvrdoća, zajedno s dobrom otpornošću na trošenje i koroziju. Predstavnici: *silicijev karbid* (SiC) te *silicijev nitrid* (Si_3N_4) kao najčešće korišten keramički materijal na području obrade odvajanjem čestica s obzirom da ima nešto bolja mehanička svojstva.

Varijante Si_3N_4 keramike su oksinitridi i SIALON-i. Ovdje je sirovina obogaćena većim udjelom oksida u odnosu prema Si_3N_4 sirovini, s ciljem sinteze određenih oblika miješanih kristala između Si_3N_4 i metalnih oksida, na primjer Al_2O_3 , koji pri nižim temperaturama sinteriranja iskazuju slična svojstva kao i Si_3N_4 . Mehanička svojstva mogu se podešavati u širokom rasponu, ovisno o vrsti i količini dodataka. Naglašena je i usporedno veća lomna žilavost, pa su zato prikladni za izradu raznih alata najčešće u obliku reznih pločica kao na slici 18.

Prednosti keramike u odnosu na alatne čelike i tvrde metale rezultat su sastava i krsitalne strukture. Generalno gledajući, keramike su tvrde, inertne te odlično zadržavaju prvobitna svojstva pri visokim temperaturama. Smanjenjem tendencije krhkom lomu, potencijal za

primjenu keramike kao reznog alata za obradu čelika povećan je te se time smanjio udio tvrdih metala kao materijala reznih pločica.

Iako se po pojedinim svojstvima različite vrste keramike mogu razlikovati, općenito svojstva koja karakteriziraju keramičke materijale su [8]:

- + visoka tvrdoća
- + visoka čvrstoća (osobito tlačna)
- + visoka otpornost na puzanje
- + visoke dopuštene temperaturne primjene
- + visok modul elastičnosti
- + korozijska postojanost
- + kemijska inertnost
- + visoka otpornost na trošenje
- + mala gustoća
- + vrlo dobra električna izolacija
- + dobra toplinska izolacija
- krhkost (niska lomna žilavost)
- osjetljivost na temperaturne šokove



Slika 18. Različiti oblici keramičkih reznih pločica [10]

5.1. POVIJEST RAZVOJA TEHNIČKE KERAMIKE

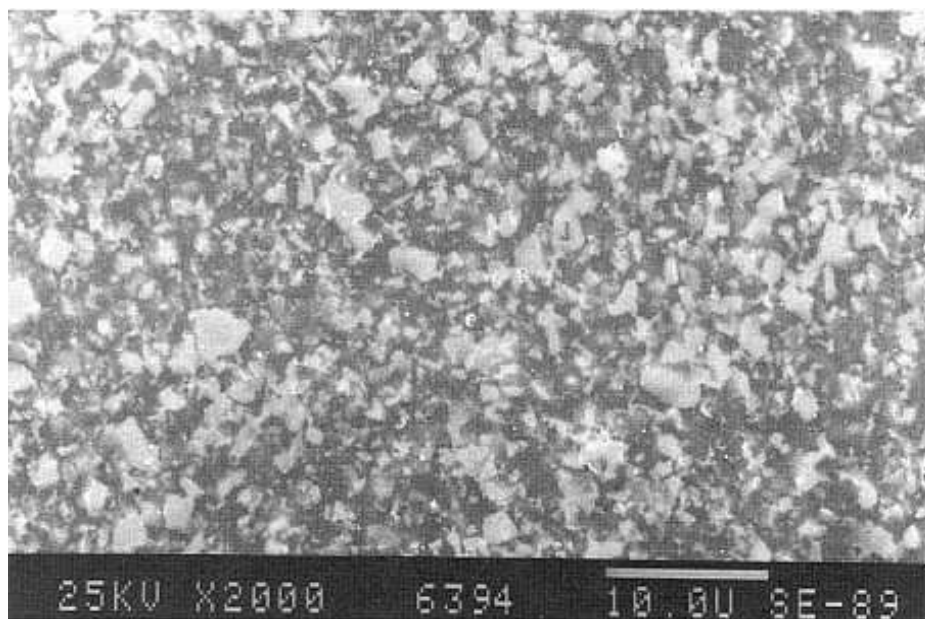
Prvi keramički materijali primjenjeni u obradi odvajanjem čestica bili su čisti Al_2O_3 sa staklastim vezama sinterirani na visokim temperaturama primjenjeni još početkom 20. stoljeća. Kontroliranim dodavanjem magnezijevog oksida (MgO) omogućena je eliminacija nepoželjne staklene faze koja je uzrokovala degradaciju svojstava pri temperaturama rezanja metala, te je reducirani porast zrna pri sinteriranju, što je poboljšalo čvrstoću materijala, i omogućilo postizanje 98% od teoretske gustoće te veličine zrna od 3 μm . Bili su prikladni za završnu obradu sivog lijeva i nekih mekših čelika. Pokazivali su dobru otpornost na abraziju te im je tvrdoća povećana u odnosu na ostale do tada primjenjivane materijale. No s obzirom da je takva vrsta Al_2O_3 pokazivala nedostatke u smislu lomne žilavosti i otpornosti na temperaturne šokove, primjena im je bila ograničena.

Sljedeći se pomak dogodio otkrićem tehnologije vrućeg prešanja aluminija koji je značajniju primjenu doživio 60-ih godina prošlog stoljeća. Vruće prešanje je kao proces zgušnjavanja lakše provediv i otporniji na eventualne neželjene promjene u odnosu na sinteriranje te se njime postiže potpuna gustoća u gotovo svim slučajevima. Smanjen je utjecaj kvalitete praha za koji više nije kritično da je vrhunske čistoće kao kod sinteriranja.

Od 80-ih godina nadalje, dolazi do najznačajnijih napredaka na području proizvodnje tehničke keramike. Ostvaren je značajni napredak u proizvodnji keramičkog praha za proizvodnju alata. Razvojem tehnologije proizvodnje praha dobiveni su čisti, fino dispergirani, te prahovi bez nečistoća. Istovremenom s napretkom u proizvodnji praha, događaju se i značajna unapređenja procesnih tehnika i opreme. Može se činiti nevažno, ali mogućnost kvalitetnog mljevenja praha od vitalne je važnosti. Unapređenjem tehnike i opreme za mljevenje poteklo je iz Japana i omogućilo još jedan korak unaprijed u smislu razvoja keramike. Unaprijeđene su i peći za sinteriranje. Peći bez grafita i peći za vruće prešanje za koje se koriste vatrootporni metali te vakuumsko čišćenje omogućili su stvaranje vrlo čiste atmosfere za sinteriranje s važnom opcijom odabira neutralne ili reducirajuće atmosfere [4].

5.2. MJEŠANA KERAMIKA Al_2O_3 + TiC/TiN

S obzirom na to da je primjena čiste oksidne keramike zbog nešto lošijih svojstava u odnosu na mješanu i whiskerima ojačanu oksidnu keramiku, u stalnom padu, pregled počinje od navedene vrste mještane odnosno karboksidne keramike koja sadrži aluminihev oksid (Al_2O_3) s dodatkom od 30-40% titan karbida (TiC) i/ili titan nitrída (TiN). Disperzijom tvrdih čestica TiC i TiN omogućeno je povećanje tvrdoće materijala na temperaturama od 800°C u komparaciji sa čistom oksidnom keramikom. Istovremeno su lomna žilavost i savojna čvrstoća također povišene što rezultira većom otpornosti na krhki lom. Povišena tvrdoća u kombinaciji s povišenom žilavosti značajno povećava i otpornost na abrazivnu komponentu trošenja. Veća toplinska vodljivost i manji koeficijent toplinskog istezanja utječu na bolja svojstva ove vrste keramike na temperaturne šokove. No pri temperaturama preko 800°C , TiC i/ili TiN oksidira i narušena su prvobitna svojstva, na što treba posebno pripaziti prilikom odabira parametara obrade: brzina rezanja, dubina rezanja i posmak; kako nebi prekoračili vrijednost temperature od 800°C [4].



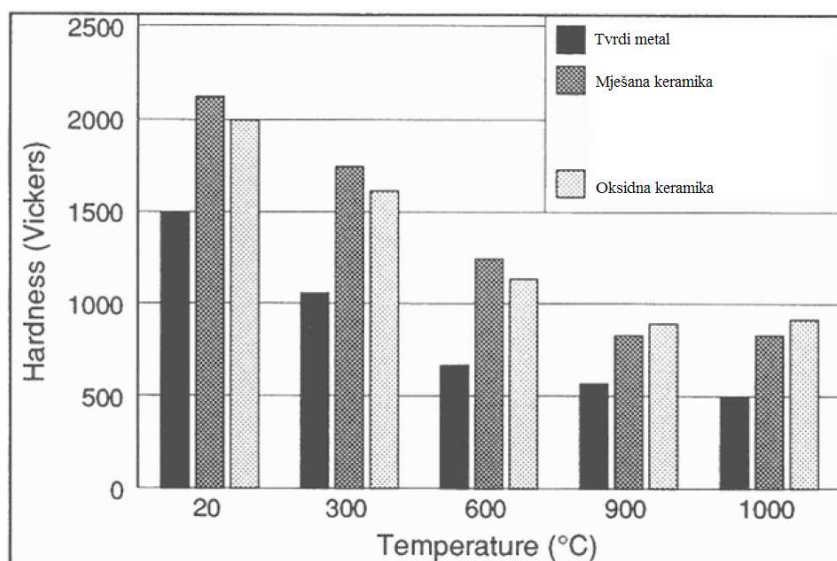
Slika 19. Mikrostruktura miještane keramike Al_2O_3 + 30% TiC [4]

Tablica 4. Neka fizikalna svojstva oksidne i mješane keramike ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$) u usporedbi sa tvrdim metalom (P20) te cermetom na bazi $\text{TiC} + \text{ZrC}$ [4]

Rezni materijal:	Oksidna keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	Mješana keramika Al_2O_3 + TiC/TiN	Tvrđi metal (P20)	Cermet ($\text{TiC} +$ ZrC)
Tvrdoća (HV)	2000	2200	1500	1600
Modul elastičnosti (kN/mm^2)	390	400	550	500
Svojna čvrstoća (kN/mm^2)	350	600	2100	1700
Lomna žilavost (mN/mm^2)	4,5	5,4	12	12,5
Koef. topl. istezanja (K^{-1})	$7,5 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$
Toplinska vodljivost (W/mK)	30	35	38	10

Pri proizvodnji ove vrste keramike upotrebljavaju se prahovi visoke čistoće i zrnaca veličine max. 1 μm . Jednoliko mješanje komponenti postiže se suhim ili mokrim mljevenjem. Dodavanje organskih veziva omogućava nesmetano odvijanje procesa proizvodnje. Toplinska je obrada kritični dio, cilj je smanjiti poroznost i istovremeno zadržati finu mikrostrukturu. TiC i TiN , naime, sprječava zgušnjavanje tokom toplinske obrade. Razvijeni su različiti procesi koji prevladavaju navedeni problem, a svi se temelje na istovremenom povećanju parametara temperature i tlaka. Upotrebom grafitnih matrica na temperaturama od 1600 – 1750°C omogućeno je mehaničko zgušnjavanje materijala pri tlakovima od 200 – 350 bar. Grafit omogućuje primjenu maksimalnih temperatura i tlaka koji značajno smanjuju pojavu poroznosti unutar keramičkog materijala. U posljednje vrijeme koristi se postupak vrućeg izostatičkog prešanja pri tlakovima od 2000 bar u atmosferi inertnih plinova (N_2 , Ar). Taj proces zahtjeva hermetički izoliranost materijala ili prethodno sinteriranje na 94% od svoje maksimalne gustoće kako bi se spriječio ulazak inertnog plina u sam materijal. Vrućim izostatičkim prešanjem dobiva se veća gustoća te se smanjuje poroznost što rezultira povišenjem kvalitete dobivenog materijala te kasnije i alata [4,12].

Tablica 5. Komparacija tvrdoće u ovisnosti o temperaturi tvrdog metala, čiste oksidne keramike i mješane keramike ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$) [4]

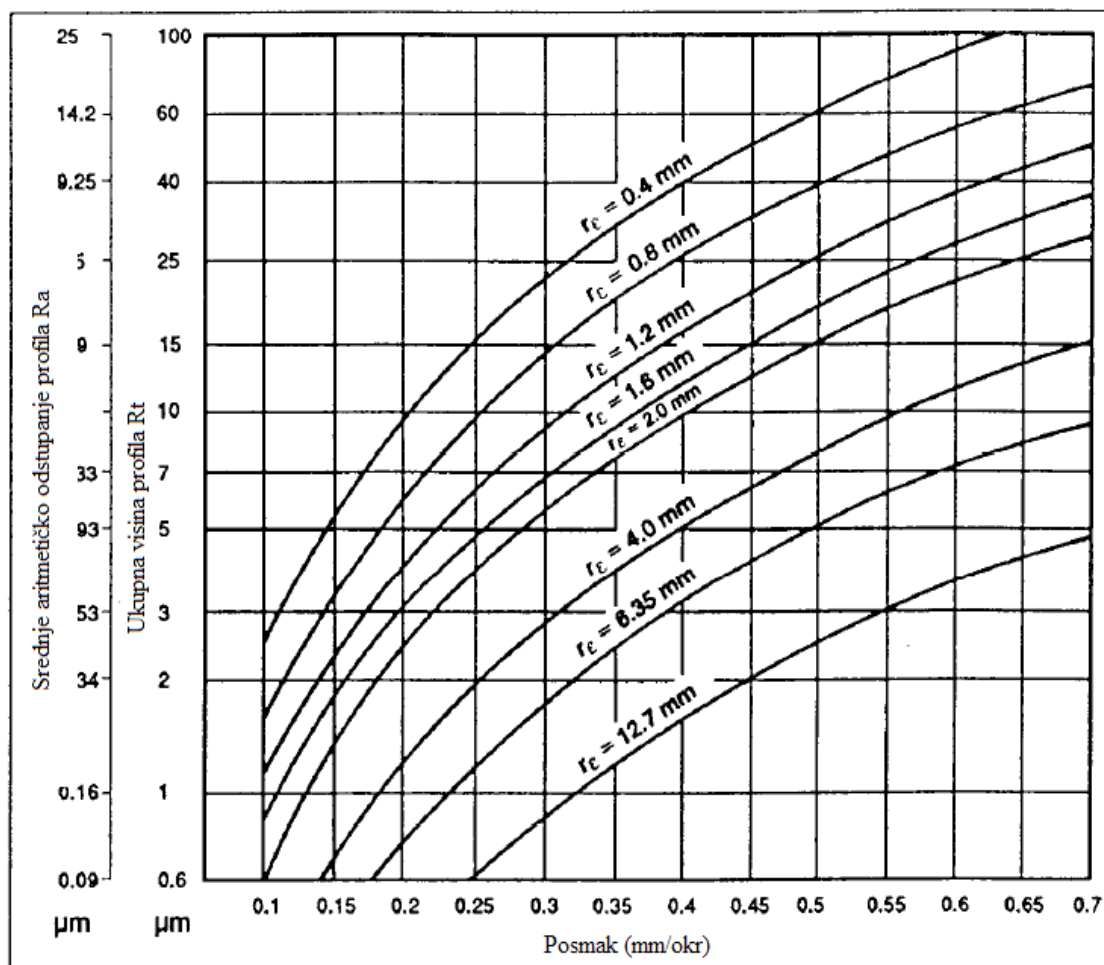


$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$ uglavnom se upotrebljava za obradu metala na bazi željeza pri visokim brzinama rezanja kada se zahtjeva visoka dimenzijska točnost te fina obrada. Isprekidana obrada se jedino tolerira u slučaju pojave vrlo malih presjeka odvojene čestice i vrlo čvrstom konstrukcijom reznog vrha oštrice alata dobivenim kružnim ili kvadratnim pločicama sa tzv. *t-land* oblikom reznog ruba. Cilj pripreme rezne oštrice je eliminacija mikročestica zaostalih od prethodnih operacija te ujedno i povećana čvrstoća. Ovaj se materijal isključivo upotrebljava za izradu reznih pločica, a alati cjelokupno izrađeni od $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$ gotovo da i ne postoje. Niža savojna čvrstoća i žilavost u odnosu na tvrde metale uvjetovala je konstrukciju držača pločice s dubljim džepovima za prihvat te tanje keramičke pločice. Uglavnom se koriste alati s negativnim prednjim kutem γ , iako se pri niskim silama rezanja, odnosno smanjenim parametrima obrade, također upotrebljava i pozitivni kut γ . Radijusi vrha oštrice od 0,4 mm i manji vrlo su rijetki i neprikladni za pločice od mješane keramike [4].

Osnovni parametri obrade su brzina rezanja, posmak te dubina rezanja. Oblik i veličina obratka, materijal i njegova tvrdoća, kvaliteta površine te tolerancije, kapacitet stroja i zahtjevana produktivnost faktori su koji determiniraju parametre obrade. Kritični parametar za primjenu mješane keramike jest posmak, koji utječe na kvalitetu površine, no može izazvati i pucanje pločice u slučaju prevelike zadane vrijednosti. Sljedeća tablica prikazuje smjernice za odabir

posmaka i radijusa zakrivljenosti reznog vrha pločice za postizanje određene kvalitete površine [4].

Tablica 6. Utjecaj posmaka i radijusa zakrivljenosti oštrice alata na hrapavost obrađene površine [4]

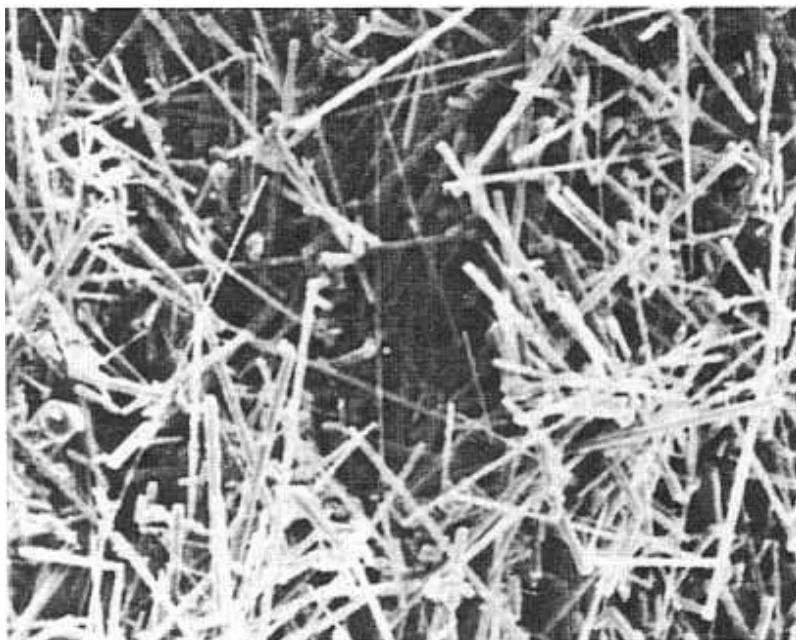


5.3. WHISKERIMA OJAČANA OKSIDNA KERAMIKA

Aluminijev oksid mnogo se godina uspješno upotrebljavao za visokobrzinske obrade, prvenstveno zbog svoje izuzetne tvrdoće i kemijske postojanosti na visokim temperaturama. No njegova je upotreba bila ograničena zbog niske otpornosti na lom. Kao rezultat dugogodišnjih istraživanja, razvijena su 2 mehanizma kojima se povećava žilavost Al_2O_3 [4]:

- povišenje žilavosti transformacijom cirkonija
- whiskerima ojačan Al_2O_3

Rezni alati s povišenom žilavosti transformacijom cirkonija danas su u širokoj upotrebi. Ojačavanje Al_2O_3 monokristalima silicijeva karbida (SiC) jedno je od novijih otkrića. Ti kompoziti sadrže prosječno 45% udjela whiskera, ovisno o strukturi matrice. Uglavnom svi whiskeri sadrže β – fazu ili mješavinu α i β faze SiC. Ovisno o proizvođaču, dimenzije whiskera kreću se od radijusa 0,05 – 1,0 μm u poprečnom presjeku te 5 – 125 μm u longitudinalnom smjeru. Na sljedećoj slici prikazani su whiskeri SiC pod povećanjem elektronskog skenirajućeg mikroskopa od 1250 \times .



Slika 20. Prikaz SiC whiskera pod povećanjem od 1250 \times [4]

U različitim je istraživanjima otkriveno da lomna žilavost whiskerima ojačanog $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_{(w)}$ kompozita više nego dvostruko nadilazi lomnu žilavost Al_2O_3 bez whiskera. Whiskeri sprečavaju zgušnjavanje (kao i TiC/TiN) prilikom sinteriranja, te se zahtjeva vruće prešanje kompozita koji sadrže više od 10 – 15% volumnog udjela whiskera. Posljedica upotrebe whiskera za rezne alate su anizotropna svojstva zbog njihove usmjerene orijentacije kristala. Najznačajnija primjena ove vrste keramike odnosi se na obradu superlegura nikla. Superlegure su vrlo zahtjevni materijali za obradu odvajanjem s obzirom da očvršćuju tijekom obrade te zadržavaju svojstva i pri povišenim temperaturama uzrokovanih obradom. Uporabom tvrdih metala nemoguće je niti približno postići produktivnost pri obradi takvih legura koje tvrdi metali postižu pri obradi drugih vrsta metala. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$ osigurao je prvi značajniji napredak u povećanju produktivnosti obrade te omogućio podizanje brzina rezanja s 15 – 60 m/min na 120 – 240 m/min, s obzirom na značajno veću tvrdoću i čvrstoću $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$ pri povišenim temperaturama. No najvažniji napredak u obradi superlegura ostvaren je uvođenjem $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_{(w)}$ reznih alata koji su omogućili porast brzine rezanja na čak 750 m/min [4].



Slika 21. Rezne pločice od keramike ojačane whiskerima [13]

Odabir pravilnog oblika i priprema rezne oštrice kod ove vrste keramike od velike je važnosti s obzirom da ima veliku sklonost nastanku kratera. Osim kraterskog trošenja koje je dominantni oblik, prisutno je i trošenje stražnje površine, odkrhnuće oštrice, razgradnja te lom. Mišljenje je da se pojava kratera događa zbog „izvlačenja“ materijala alata koje uzrokuje odvojena čestica. Moguće je poduzeti nekoliko koraka kako bi minimizirali efekt stvaranja kratera, npr. ukositi ulaz noža u zahvat, varirati različite dubine rezanja kako bi onemogućili koncentraciju efekta kratera na jednom mjestu na pločici te izbjegavati situacije u kojima dijamantni i kvadratni oblici pločica naginju stvaranju kratera sa obje strane oštrice. Odabirom najpovoljnije geometrije pločice s najvećim dozvoljenim radijusom te oblika izvedbe same rezne oštrice utječe se na bolje rezultate postojanosti i vijeka trajanja pločice. Posebno veliku zastupljenost kod ove vrste rezne keramike imaju okrugle pločice. Ne samo zbog toga što je kružni oblik najčvršći, nego i ima i mogućnost korištenja različitih napadnih kuteva (κ) s obzirom na različite dubine rezanja. Kako se dubina rezanja povećava, napadni se kut smanjuje i obratno. Ova značajka od velike je važnosti pri izboru alata za obradu materijala povišene tvrdoće, u koje su uključene i sve superlegure nikla koje se koriste u izradi turbinskih lopatica mlaznih motora [4].

5.4. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ (ZTA) KERAMIKA

Korištenje cirkonija (Zr) za inženjersku keramiku počinje s upoznavanjem samog cirkonija i njegovih alotropskih modifikacija, razvojem proizvodnje (metalurgija praha) te njegove kemijske, toplinske i fizikalne stabilnosti tijekom procesa. Dodavanjem magnezijeva oksida (MgO), kalcijeva oksida (CaO), itrijevog oksida (Y_2O_3), te cerijevog oksida (CeO_2) te drugih rijetkih kristala u obliku mješanih oksida u kombinaciji sa cirkonijem rezultirali su razvojem novih materijala pogodnih svojstava. ZrO_2 posjeduje 3 poznate kristalne faze: monoklinska (m), tetragonalna (t) te kubična (c). Na sobnoj temperaturi je u monoklinskom obliku, te zagrijavanjem na 1000°C prelazi u tetragonalni, a kubična se javlja pri 2370°C . S obzirom na variranje količine dodanih oksida, mijenja se i dijagram fazne transformacije te je moguće dobivanje materijala relativno širokog spektra svojstava. Globalno promatrajući, bijela keramika općenito ima problem niske lomne žilavosti, koja se pokušava poboljšati upravo dodavanjem navedenih oksida te faznim pretvorbama, no predstavlja još nedovoljno kvalitetan odgovor na ostale vrste keramike koje se primjenjuju u obradi odvajanjem [4,12].

5.5. NEOKSIDNA REZNA KERAMIKA (Si_3N_4)

Tehnologija metalurgije praha omogućila je značajni napredak prema tzv. *near – net shape* proizvodnji, koja se pak odnosi na mogućnosti proizvodnje dijelova u približno konačnom obliku. No ipak i dalje postoji značajna količina metalnih poluproizvoda koji zahtijevaju barem završnu strojnu obradu. Troškovi strojne obrade u SAD-u 1994.god. procijenjeni su na 100 milijardi dolara, od čega 1 milijarda otpada na trošak reznih alata. Idealni rezni alat objedinjuje sljedeća svojstva: visoka čvrstoća, visoka tvrdoća te visoka otpornost na trošenje. Sve veći zahtjevi za većom produktivnošću i nižim troškovima proizvodnje impliciraju potrebu razvoja kvalitetnijih reznih alata koji će biti u stanju raditi na visokim brzinama rezanja s kojima neizbježno dolazi i do pojave visokih temperatura na sučelju alat – obradak. Jedan od odgovara na taj izazov je i neoksidna keramika na bazi silicijevog nitrda (Si_3N_4) [4].

Jednofazni Si_3N_4 je spoj koji se pojavljuje u dvije heksagonalne kristalne forme, α , te stabilnija β . Svaka je od tih struktura izvedena iz osnovnog Si_3N_4 tetraedra pridruženog u trodimenzionalnu mrežu sa zajedničkim bridovima, gdje su dušikovi atomi zajednički trima tetraedrima. α - Si_3N_4 transformacija u β - Si_3N_4 postiže se precipitacijskom reakcijom Si_3N_4 i rastaljenog stakla. Snažne kovalentne veze Si_3N_4 temelj su izvrsnim svojstvima ovog materijala [14]:

- visoka čvrstoća
- toplinska stabilnost (do 1850°C – pri toj se temperaturi raspada)
- dobra otpornost prema oksidaciji
- nizak koef. toplinskog širenja (otpornost na toplinske šokove)
- visok modul elastičnosti (veći od mnogih metala)

Negativna strana ovog materijala iz perspektive njegove proizvodnje, odnosi se na vrlo nizak koeficijent vlastite difuzije što ga čini gotovo nemogućim proizvesti s visokom gustoćom klasičnim tehnologijama proizvodnje keramike te se zahtjeva dodavanje aditiva kojima se konačna gustoća povećava. Najčešća nečistoća praha za proizvodnju, koji se uglavnom sastoji od α - Si_3N_4 faze, jest silicijev oksid (SiO_2) koji se pojavljuje na površini čestica praha. Različiti dodaci za sinteriranje koji se također dodaju u obliku praha mješaju se standardnim tehnikama

mljevenja i mješanja praha. Materijal se naknadno zgušnjava, obično u atmosferi dušika, pečenjem na visokim temperaturama. Vruće prešanje, sinteriranje pri visokom tlaku te vruće izostatičko prešanje pri 1600°C tehnike su kojima se zgušnjavaju proizvodi od Si_3N_4 . U procesu zgušnjavanja, dodaci za sinteriranje reagiraju s SiO_2 tvoreći tekućinu (staklo), koje omogućuje lakšu reorganizaciju molekula Si_3N_4 . U staklu se razlažu molekule α - Si_3N_4 faze i precipitiraju u obliku β - Si_3N_4 preko rekonstruktivne fazne transformacije. Daljnjim tijekom, jezgre β - Si_3N_4 rastu u zrna izduženog oblika i isprepletene strukture. S obzirom na dodatke koji se dodaju pri sinteriranju, ova je keramika podjeljena u nekoliko podskupina [4,9,14]:

1. Si_3N_4 + pomoćni materijal sinteriranja
2. Si_3N_4 + kristalna faza (SIALON) + pomoćni materijal sinteriranja
3. Si_3N_4 + tvrdi materijali (TiN, ZrO_2 , SiC – whisker...) + pomoćni materijal sinteriranja

Mehanička svojstva dobivene silikatne keramike ponajviše ovise i veličini i rasporedu β - Si_3N_4 zrna, pretpostavljajući potpunu pretvorbu α u β fazu, te o samim dodacima pri sinteriranju. Veličina i raspored zrna β – faze usko su povezani s mehaničkim svojstvom lomne žilavosti (K_{IC}), te samim time i čvrstoćom materijala. Tablica 6 prikazuje razliku svojstava silikatne keramike s dodatkom Al_2O_3 i Y_2O_3 vruće prešane 90 te 400 min uz konstantne parametre tlaka i temperature, a slika 22 pripadajuće mikrostrukture pri povećanju od 1250 \times [14].

Tablica 7. Mikrostruktura i mehanička svojstva Si_3N_4 s dodatkom Al_2O_3 i Y_2O_3 vruće prešan 90 i 400 min uz konstantnu temperaturu i tlak [4]

Vrijeme zgušnjavanja (min)	Prosječni promjer veličine zrna (μm)	Prosječni omjer zrna	Lomna žilavost (mN/mm^2)	Svojna čvrstoća (mN/mm^2)
90	0,37	3,0	4,7 \pm 0,3	773 \pm 67
400	0,59	2,7	5,4 \pm 0,5	896 \pm 29



Slika 22. Mikrostruktura $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Y}_2\text{O}_3$ vruće prešanog pri: a) 90min, b) 400min [4]

Prilikom strojne obrade, rezni se alat suočava s pojavom naprezanja te visokih temperatura zbog trenja te smičnog naprezanja. Pri tim uvjetima, rezna oštrica alata podložna neprekidnoj promjeni zbog mehanizama trošenja (mehaničko i kemijsko trošenje). Dominantni oblik trošenja ovisi o uvjetima obrade te vrsti materijala alata i obratka. Iako se misli da su alati izrađeni od Si_3N_4 keramike najčešće podložni kemijskom tipu trošenja (difuzija, oksidacija), pri testiranju tokarenjem sivog lijeva pri brzinama rezanja od 25 m/s (1500 m/min), došlo je do spoznaje da je ipak abrazija, odnosno mehanički tip trošenja dominantan. No to naravno vrijedi isključivo za slučaj obrade sivog lijeva koji je pokazao minimalnu difuzijsku reakciju između Si_3N_4 i sivog lijeva. S obzirom na rezultate dobivene prilikom obrade sivog lijeva, zaključuje se kako mehanička svojstva Si_3N_4 ta koja će odrediti učinkovitost prilikom obrade. Znajući da su svojstva Si_3N_4 keramike u odnosu na prethodno spomenute, jasno je da će i vijek trajanja alata upotrebom Si_3N_4 (pri odgovarajućim uvjetima!) biti veći što rezultira povećanom produktivnošću i smanjenjem troškova koji se odnosi na alate [4].

No za razliku od obrade lijevova, primjena ovog materijala za obradu čelika pokazala se neuspješnom. Naime, difuzijska reaktivnost para čelik – Si_3N_4 , u odnosu na par lijevovi – Si_3N_4 , je daleko veća. Stvaranje kratera je dominantni oblik trošenja što potvrđuje saznanje o kemijskom trošenju kao dominantnom obliku prilikom obrade čelika. Nešto bolje rezultate pokazuje silicijev nitrid kojem je prilikom proizvodnje dodana veća količina Al_2O_3 , odnosno SIALON, no to još ne omogućuje primjenu ove keramike u komercijalnu upotrebu za obradu odvajanjem čelika [4].

Prilikom testiranja različitih vrsta Si_3N_4 keramike za obradu superlegura, dobiveni su vrlo zahvalni rezultati. Omogućena je primjena većih brzina rezanja nego što je whiskerima ojačanog Al_2O_3 te samim time i povećana proizvodnost i vijek trajanja alata [4].

Tablica 8. Svojstava različitih vrsta oksidnih (Al_2O_3) i neoksidnih (Si_3N_4) reznih keramika [4]

Materijal	Youngov modul elastičnosti (Gpa)	Lomna žilavost (Mpa)	Svojna čvrstoća (MPa) 25°C	Toplinska vodljivost (W/mK)	Koef. topl. istezanja (10^{-6}K^{-1})
Al_2O_3	390	2,9	270	32,3	8,2
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_{(w)}$	400	6,0	675	35,2	155
Si_3N_4	300	4,4	775	19,4	2,5
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiC}_{(w)}$	335	6,4	995	25,2	2,9



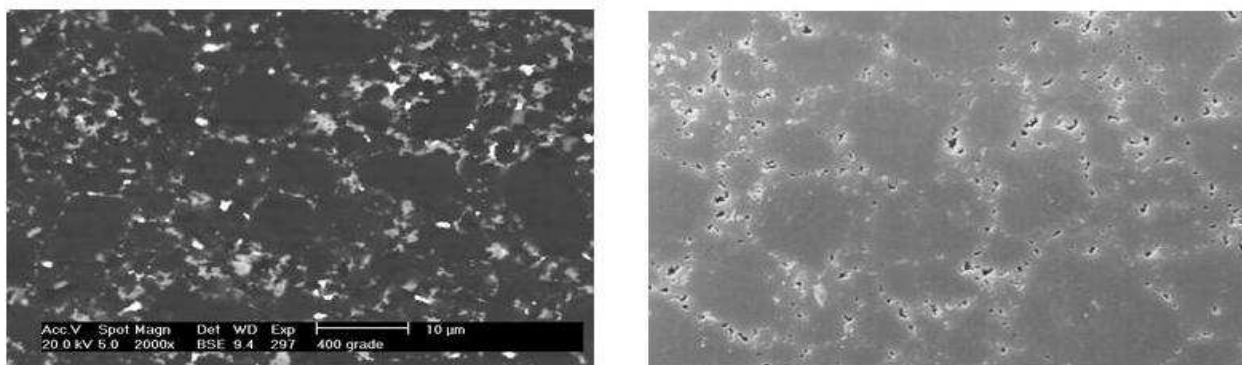
Slika 23. Tokarski nož s reznom pločicom od silicijevog nitrida [11]

6. VISOKOTVRDI ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA

Skupinu visokotvrdih materijala koji se primjenjuju u obradi odvajanjem čestica čine polikristalni dijamant (PCD) te kubični bor nitrid (CBN). Njihova tvrdoća i do 5 puta može nadmašiti prosječnu tvrdoću rezne keramike [3].

6.1. POLIKRISTALNI DIJAMANT (PCD)

Stoljećima u povijest kada je čovjek otkrio dijamant, odmah je uočeno da se radi o neobičajeno tvrdom materijalu. U evoluciji čovječanstva, alati izrađeni od tvrdih materijala postajali su sve važniji u proizvodnji hrane, oružja i štitova i nije bilo potrebno mnogo vremena čovjeku da započne eksperimentirati i sa dijamantom kao alatom. No ograničena dostupnost dijamanta, svela je njegovu upotrebu uglavnom na alate za graviranje. Počecima 20. stoljeća dijamantni alati mehanički pričvršćeni ili ugrađeni u metalne šipke koristili su se ili za bušenje ili za erodiranje površina. Kasnije se, s razvojem tehnologije sinteriranja, dijamantni prah ugrađivao u metalne matrice. Vrlo brzo nakon toga shvaćeno je da primjenom ekstremnih vrijednosti temperature i tlaka moguće ugljik transformirati u gušći dijamant. Umjetni (sintetski) dijamant, proizvodi se uporabom katalitičke otopine pri visokim temperaturama i tlakovima pri čemu dijamant tvori stabilnu fazu. Rast kristala moguće je kontrolirati pa se mogu postići kristali veličine nekoliko μm do više mm. Sinteza dijamanta proizvodi monokristalne dijelove dijamanta koji se vrućim prešanjem prerađuju u polikristalne rezne dijelove [4]. Na slici 22 prikazana je mikrostruktura PCD-a, tamna mjesta su zrnca dijamanta, a svijetlo prikazano je katalitička otopina (Co) preostala iz proizvodnje.

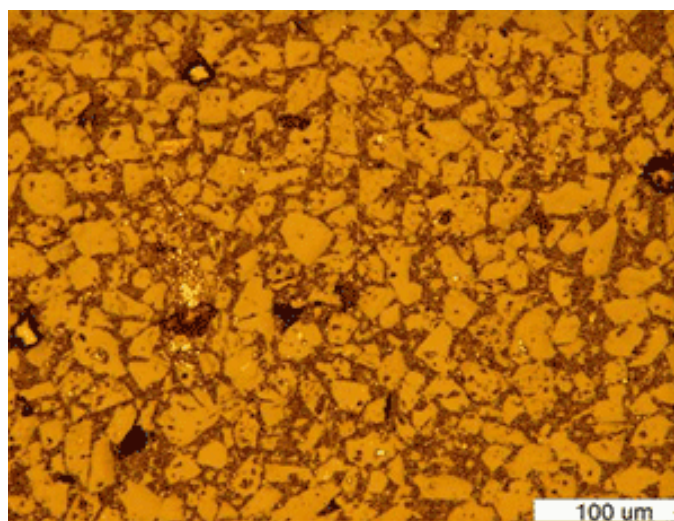


Slika 24. Prikaz mikrostrukture PCD-a (povećanje od 500 \times) [15]

6.2. KUBIČNI BOR NITRID (CBN)

Usporedno s otkrićem sinteze dijamanta, znanstvenici su otkrili da bor (B) i dušik (N) također mogu tvoriti plošno centriranu (FCC) kubičnu rešetku poput dijamanta. Spoj borovog nitrida poznat je od 1920-ih godina, no također kao mekan materijal, s heksagonalnom strukturom rešetke kao i grafit. Nakon brojnih eksperimenata sintezom CBN-a dobiven je vrlo tvrdi spoj kubične strukture, i gustoće približne kao i dijamant. Nakon daljnje procjene utvrđeno je da je CBN gotovo savršen konkurent dijamantu u smislu materijala za izradu alata za obradu odvajanjem. Za razliku od mnogih tvrdih metala, cermeta i keramike, zrnca CBN-a i dijamanta su direktno sinterirana bez dodavanja vezivne komponente. Kako su radne površine većine reznih alata uglavnom dvodimenzionalne sinterirani dijamant ili sinterirani CBN uglavnom se upotrebljavaju kao tanki slojevi (0,2 – 1 mm debljine) na pločicama od tvrdog metala. Takva kombinacija posjeduje nekoliko prednosti. Karakterizira je viša žilavost te niža cijena u odnosu na pločice cjelokupno izrađene od PCD-a ili CBN-a. U novije se vrijeme CBN-u dodaju i različita veziva uz dodatak različitih karbida s ciljem varijacije svojstava, iako BCBN (binderless cubic boron nitrid) odnosno kubični bor nitrid bez veziva karakteriziraju neke vrlo bitne prednosti što ga čini povoljnijim odabirom ako se primjenjuje za visokobrzinsku obradu [3]:

- Velika toplinska vodljivost i izvrsna otpornost toplini i toplinskim šokovima, stoga je i minimizirana mogućnost toplinskih napuknuća (thermal cracks) i krzanja na oštreci alata.
- Pogodan je za prekidne obrade, ima izvrsna mehanička svojstva (tvrdoća, čvrstoća) jer je izgrađen od čestica čija veličina ne prelazi 0,5 μm i koje su čvrsto povezane jedna s drugom bez veziva ili agensa i katalizatora na granicama zrna.
- Može se rezati i lemiti kako bi se dobili oblici pogodni za primjenu u tokarenju i glodanju, kao i za izradu specijalnih lemljenih alata.



Slika 25. Mikrostruktura CBN-a [15]

6.3. SVOJSTVA I PRIMJENA CBN-a I PCD-a

Već je rečeno kako je dijamant najtvrdi poznati materijal u prirodi, no uz to posjeduje i karakteristike visoke toplinske vodljivosti, niskog koeficijenta toplinske ekspanzije, te nizak koeficijent trenja, što su ujedno karakteristike i CBN-a. Određene fizikalne karakteristike navedenih materijala prikazane su u tablici 2 (str. 14). Primjena PCD-a ograničava se na obradu odvajanjem neželjeznih legura, tvrde i meke gume, stakla, polimera i kamena. Primjerice, potpuno je inertan pri obradi lakih metala kao što su aluminij i cink. Za obradu željeznih materijala se ne upotrebljava zbog visokog afiniteta ugljika prema željezu, ali i zbog relativno niskih temperatura pri kojima izgara (900°C), te mu se područje primjene uglavnom svodi na temperature do max. 650°C . Nedostaci su mu također i niska tlačna i savojna čvrstoća koje iznose 3000 N/mm^2 odnosno 600 N/mm^2 . Usprkos navedenim nedostacima, dijamant je vrlo raširen rezni materijal, pogotovo u automobilske i zrakoplovnoj industriji. Aluminijske legure, kompoziti s metalnom matricom te vlaknima ojačani polimeri najbolje se obrađuju upravo PCD reznim pločicama. CBN je također inertan prema navedenim materijalima, no s obzirom na nižu tvrdoću ipak ne može konkurirati PCD-u na tom području primjene. Za razliku od PCD-a, CBN omogućuje obradu svih vrsta materijala, pa tako i željeznih legura pri temperaturama koje nadmašuju 1000°C . Također je manje reaktivna i pri obradi legura nikla i kobalta. Još jedna prednost CBN-a u odnosu na PCD jest značajno manja sklonost oksidaciji. Podaci o Knoopovoj tvrdoći pojedinih materijala prikazana su u sljedećoj tablici, br. 8 [3,4].

Tablica 9. Usporedba Knoopove tvrdoće različitih reznih materijala [4]

Materijal	Tvrdoća po Knoopu (kg/mm^2), 25°C
PCD	6000 – 11000
CBN	4000 – 5000
Borov karbid (B_4C)	2200
Volframov karbid (WC)	2200
Aluminijev oksid (Al_2O_3)	2000
Silicijev karbid (SiC)	1800 - 3900
Visokotvrđi čelici	400 - 800



Slika 26. CBN rezne pločice [16]

7. ZAKLJUČAK

Jedan od zahtjeva koji je suvremena proizvodnja nametnula odnosi se na povećanu produktivnost. U tom smislu, ako je riječ o obradi odvajanjem, kvalitetan odgovor daje visokobrzinska obrada. No njezina negativna posljedica odnosi se na pad postojanosti rezne oštrice alata. Primjenom odgovarajućih materijala, a pogotovo keramičkih, omogućuje se djelomično rješavanje tog problema. Svojim pozitivnom svojstvima, prethodno navedenim u radu, omogućena je njena učinkovita primjena pri ekstremnim brzinama rezanja i visokim temperaturama koje ju neizbježno prate. Daljnji se napredak prvenstveno treba bazirati na pokušaju smanjenja tendencije keramike krhkom lomu što bi potencijal primjene keramike proširio u značajno većoj mjeri. Razvojem tehnologija proizvodnje keramike, te eksperimentiranjem s ciljem razvoja još kvalitetnijih keramičkih materijala, mogu se očekivati daljnja usavršavanja koja će se sve više približavati idealnom reznom alatu.

8. LITERATURA

- [1] S. Škorić: Predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [2] www.iscar.com
- [3] T. Udiljak: Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [4] E. Dow Whitney: Ceramic Cutting Tools; Materials, Development and Performance, Noyes Publications, New Jersey, 1994.
- [5] F. Cajner, D. Krumes, M. Novosel: Alatni materijali, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1996.
- [6] F. Cajner: Predavanja iz kolegija Alatni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] K. Suzuki, Y. Shiraishi, N. Nakajima, M. Iwai, S. Ninomiya, Y. Tanaka, T. Uematsu: Development of New PCD Made Up of Boron Doped Diamond Particles and its Machinability by EDM, online at: <http://www.scientific.net>, Trans Tech Publications, Switzerland, 2009.
- [8] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [9] http://www.ing.unitn.it/dimti/sem_research_activity.php
- [10] www.americas.kyocera.com
- [11] www.mastertechdiamond.com
- [12] T. Filetin, I. Kramer: Tehniche keramik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [13] www.dynacer.com
- [14] B.M. Caruta: Ceramics and Composite Materials: New Research, Nova Science Publishers, New York, 2006.
- [15] <http://www.ntcstm.troitsk.ru/en/depts/spm.html>
- [16] www.etec-ceramics.com

